

KOMPJUTERSKA SIMULACIJA DEBELOSLOJNIH OTPORNIKA KAO SLUČAJNIH OTPORNIH MREŽA

Zdravko Stanimirović, Ivanka Stanimirović, IRITEL, Beograd

Sadržaj - U radu je predstavljen model debeloslojnih otpornika zasnovan na perkolacionoj teoriji u kombinaciji sa determinističkim modelom tzv. RRN model. Debeloslojni otpornici su predstavljeni kao slučajne otporne mreže pri čemu parametri determinističkog modela u kombinovani model uvode mikrostrukturne, a parametri pozicionog modela sa dvostrukom perkolacijom makrostrukturne karakteristike debeloslojnog otpornika. Model je ilustrovan kompjuterskom simulacijom debeloslojnog otpornika slojne otpornosti $1k\Omega/\square$.

1. UVOD

Debeloslojni otpornici su heterogeni sistemi koji se najčešće posmatraju kao kombinacija provodne i izolacione faze. Struktura i mehanizmi provođenja još uvek nisu u potpunosti razjašnjeni uprkos činjenici da su predmet brojnih istraživanja tokom poslednjih nekoliko decenija. Jedno od najinteresantnijih pitanja je način raspodele provodne i izolacione komponente unutar zapremine otpornog sloja. Prostorna raspodela je važna zato što određuje tip mehanizama provođenja i osnovne karakteristike sloja. U prethodnim radovima smo koristili deterministički model da bi smo opisali strukturu debeloslojnih otpornika [1, 2]. Rezultati istraživanja su pokazali da važi pretpostavka da provodna faza teži da formira lance provodnih čestica pri čemu proces sinterovanja dovodi do pojave izolacionih oblasti između pojedinih susednih provodnih čestica dok ostale ostaju u kontaktu. Međutim, pored determinističkog modela, u istraživanjima je često bio u upotrebi i model zasnovan na perkolacionoj teoriji. Važno je naglasiti da je u radovima koji su se bavili ovim pristupom bila opisivana makrostruktura debeloslojnih otpornika tj. model nije uključivao mehanizme transporta naelektrisanja u otporniku već samo jednu osnovnu karakteristiku sloja: vezu provodnosti otpornika i faktora ispune provodne faze [3]. U ovom radu će biti primenjen model debeloslojnog otpornika zasnovan na perkolacionoj teoriji u kombinaciji sa determinističkim modelom da bi se debeloslojni otpornici simulirali kao heterogeni sistemi naročite vrste - tzv. slučajne otporne mreže. Model slučajne otporne mreže će biti opisan u poglavlju 2, kompjuterska simulacija debeloslojnih otpornika zasnovana na ovom modelu u poglavlju 3, dok će diskusija modela biti prikazana u poglavlju 4.

2. MODEL SLUČAJNE OTPORNE MREŽE

Slučajna otporna mreža (u daljem tekstu RRN) razvijena je na osnovu dva modela: determinističkog, koji je bio predložen u prethodnim radovima [1, 2], i perkolacionog. Iz determinističkog modela je preuzeta pretpostavka da se transport naelektrisanja u debeloslojnim otpornicima odvija

pomoću lanaca provodnih čestica. Susedne provodne čestice u ovim lancima mogu biti ili sinterovane (u kontaktu) ili razdvojene veoma tankim slojem stakla stvarajući tako metal-izolator-metal, tzv. MIM strukture. U tom slučaju, mehanizmi provođenja su provođenje kroz provodne čestice i sinterovane kontakte i tunelovanje kroz staklene barijere. Na osnovu toga, elementarne otpornosti upotrebljene za sintezu RRN su otpornost sinterovanog kontakta između dve susedne provodne čestice R_C i barijerna otpornost koja određuje otpornost MIM strukture R_B [4]:

$$R_C = \frac{\rho}{\pi a}, \quad (1)$$

$$R_B = \frac{h^2 s}{q^2 A (2mq\Phi_B)^{1/2}} \exp \left[\left(\frac{32\pi^2 mqs^2 \Phi_B}{h^2} \right)^{1/2} \right], \quad (2)$$

gde su ρ specifična otpornost kontakta, a poluprečnik poprečnog preseka barijere, q i m naelektrisanje elektrona i njegova efektivna masa, h Plankova konstanta, A površina kroz koju se vrši tunelovanje, Φ_B visina potencijalne barijere i s širina staklene barijere.

RRN se zasniva na pozicionom modelu sa dvostrukom perkolacijom. Bilo koja pozicija rešetke može biti zauzeta provodnom česticom sa verovatnoćom p ili slobodna sa verovatnoćom $1-p$ što predstavlja prvi perkolacioni problem. Drugi perkolacioni problem se bavi vezama između susednih pozicija. Dve susedne zauzete pozicije mogu biti povezane ili kontaktnom otpornošću R_C sa verovatnoćom p_1 ili barijernom otpornošću R_B sa verovatnoćom $1-p_1$. Verovatnoća p_1 je data kao:

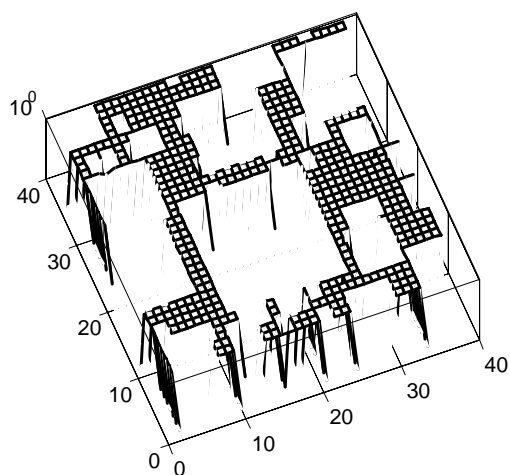
$$p_1 = \frac{N_C}{N_C + N_B}, \quad (3)$$

gde je N_C broj kontaktnih otpornosti i N_B broj barijernih otpornosti u RRN. Slučajna zauzetost bilo koje veze između dve susedne zauzete pozicije se dobija pomoću generatora slučajnih brojeva sa uniformnom raspodelom u opsegu (0,1). Ukoliko je generisani broj manji ili jednak p_1 tada vezu zauzima otpornost R_C , a ako je veći od p_1 tada vezu zauzima otpornost R_B . Kao rezultat se dobija slučajna mreža provodnih čestica koje stvaraju sinterovane kontakte ili MIM strukture a koja se potom prevodi u RRN.

3. KOMPJUTERSKA SIMULACIJA

RRN model opisan u poglavlju 2 je kompjuterski generisan i njegovu osnovu čini elementarna dvodimenziona matrica sa N^2 elemenata. Svaki element ove matrice odgovara

jednoj od pozicija modela. Zauzete i slobodne pozicije su predstavljene matricom brojeva 1 i 0 respektivno. Poziciju svakog elementa elementarne matrice određuju dva prirodna broja I i J . Prvi korak je dodela vrednosti 1 svim elementima dvodimenzione elementarne matrice. To znači da su sve pozicije modela zauzete provodnim česticama istih prečnika d . Potom se pomoću generatora slučajnih brojeva sa uniformnom raspodelom u opsegu (0,1) generiše mreža otpornosti R_B i R_C (drugi perkolacioni problem). Korišćenjem generatora slučajnih brojeva sa uniformnom raspodelom generišu se prirodni brojevi - koordinate centara čestica stakla. Prečnik D čestice stakla u kome su sve pozicije matrice nezauzete tj. svim elementima se dodeljuje vrednost 0 (prvi perkolacioni problem) se određuje generatorom slučajnih brojeva sa normalnom raspodelom pri čemu ova raspodela ima gornju (UL) i donju (LL) graničnu vrednost. Vrednost prečnika D je takođe prirodan broj. Primer jedne kompjuterski simulirane ćelije RRN dimenzija 40×40 prikazan je na slici 1. Zatim se izračunava ukupna otpornost RRN tj. debeloslojnog otpornika. Detaljan opis algoritma izračunavanja otpornosti je preuzet iz literature [5]. Na slici 2 je prikazan blok dijagram kompjuterske simulacije debeloslojnog otpornika korišćenjem modela RRN.



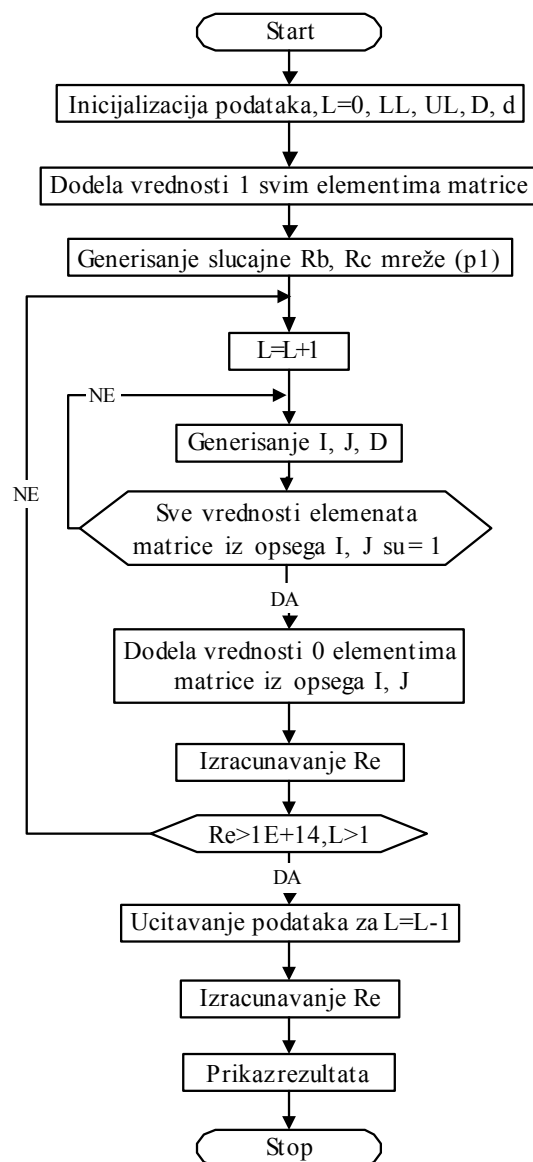
Sl.1. Jedna ćelija RRN dimenzija 40×40 dobijena kompjuterskom simulacijom (bela površina - staklo, šrafirana površina - pozicije provodnih čestica)

4. DISKUSIJA MODELA

Elementarna ćelija RRN prikazana na slici 1 je generisana kompjuterskom simulacijom pri čemu su iz determinističkog modela debeloslojnih otpornika preuzeti sledeći parametri [4]: prečnik provodne čestice $d=150\text{nm}$, donja granična vrednost prečnika zrna stakla $LL=0.1\mu\text{m}$, gornja granična vrednost prečnika zrna stakla $UL=3\mu\text{m}$. Otpornost sinterovanog kontakta između dve susedne provodne čestice R_C i barijerna otpornost koja određuje otpornost MIM strukture R_B su računane na osnovu parametara iz [4]. Radi se o debeloslojnom otporniku slojne otpornosti $R_{\square}=1\text{k}\Omega/\square$. S obzirom na činjenicu da debeloslojne otporne paste nižih slojnih otpornosti imaju veći odnos provodna/staklena faza, na slici 1 se može, pored većih staklenih oblasti formiranih tokom procesa sinterovanja, uočiti postojanje izvesnog broja provodnih lanaca koje čine susedne provodne čestice koje su u kontaktu ili su razdvojene

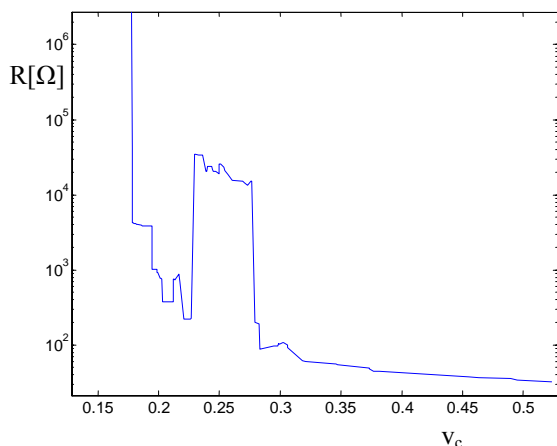
tankom staklenom barijerom. Pošto debeloslojni otpornik predstavljamo mrežom ovakvih elementarnih ćelija RRN, moguće je pomoću ovog modela odrediti graničnu vrednost faktora ispune provodne faze - vrednost pri kojoj otpornik aproksimiramo beskonačnom otpornošću (sl.3). U slučaju otpornika slojne otpornosti $1\text{k}\Omega/\square$ granični faktor ispune je 0.18. Mala vrednost graničnog faktora ispune provodne faze se objašnjava činjenicom da su dimenzije čestica stakla znatno veće od dimenzija provodnih čestica te da dolazi do prekida provodnih lanaca koji upravljaju mehanizmima provođenja u otporniku.

Na slici 4 je prikazana SEM fotografija mikrostrukture debeloslojnog otpornika realizovanog standardnim procesom sitoštampe i sinterovanim na temperaturi od 850°C u trajanju od 10 min.



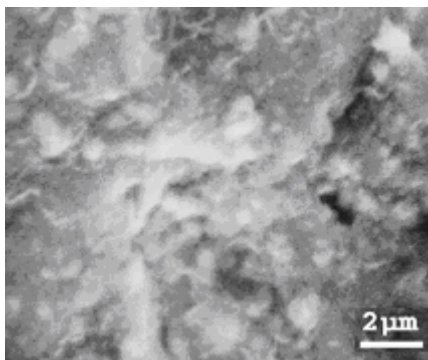
Sl.2. Blok dijagram kompjuterske simulacije debeloslojnog otpornika korišćenjem RRN modela

koja jasno pokazuje da tokom procesa sinterovanja dolazi do slučajnog i prostorno neravnomernog rasporeda staklene i provodne faze, te da jedino kombinacija determinističke i perkolacione teorije pruža realnu sliku i mogućnost kompjuterske simulacije debeloslojnih otpornika.



Sl.3. Otpornost RRN vs. faktor ispunne provodne faze za otpornik slojne otpornosti $1k\Omega/\square$ (rezultat kompjuterske simulacije)

To je od izuzetnog značaja za proučavanje degradacionih procesa i mehanizama otkaza debeloslojni komponenti u uslovima naprezanja - bilo mehaničkog ili električnog. Male promene vrednosti parametara pod uticajem naprezanja mogu dovesti do drastične promene performansi otpornika – najčešće do nelinearnog odziva koji može ugroziti rad celog sistema.



Sl.4. SEM fotografija mikrostrukture debeloslojnog otpornika slojne otpornosti $1k\Omega/\square$

5. ZAKLJUČAK

U radu je predstavljen model debeloslojnog otpornika zasnovan na perkolacionoj teoriji u kombinaciji sa determinističkim modelom tzv. RRN model. Debeloslojni otpornici su predstavljeni kao slučajne otporne mreže pri čemu parametri determinističkog modela u kombinovani model uvode mikrostrukturne, a parametri pozicionog

modela sa dvostrukom perkolacijom makrostrukturne karakteristike debeloslojnog otpornika. Novorazvijeni model je kompjuterski generisan i upotrebljen za simulaciju debeloslojnog otpornika slojne otpornosti $1k\Omega/\square$. Kao rezultat je prikazana jedna elementarna ćelija sa slučajnom prostornom distribucijom staklene i provodne komponente filma i određen je granični faktor ispunne provodne faze. Zbog sveobuhvatnosti modela, dalja istraživanja će biti usmerena ka njegovoj primeni u proučavanju degradacionih procesa i mehanizama otkaza debeloslojnih otpornika u uslovima mehaničkog i električnog naprezanja.

LITERATURA

- [1] A. Kusy, A. Szpytma, "On $1/f$ Noise in RuO_2 -based Thick Resistive Films", *Solid-State Electronics*, 29, 1986, pp. 657-665.
- [2] M.M. Jevtić, Z. Stanimirović, I. Mrak, "Low-Frequency Noise in Thick-Film Resistors due to Two-Step Tunneling Process in Insulator Layer of Elemental MIM Cell", *IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology-Part A*, Vol. 22, No. 01, March, 1999, p. 120.
- [3] E. Listkiewicz, , "Computer Simulation of Thick Resistive Films as Two-Component Percolation Systems: Segregation of the Conducting Component", *Thin Solid Films*, 130, 1985, pp. 1-15.
- [4] I. Mrak, M.M. Jevtić, Z. Stanimirović, "Low-frequency Noise in Thick-film Structures Caused by Traps in Glass Barriers", *Microelectronics Reliability*, 38, 1998, pp. 1569-1576.

Abstract - In this paper RRN model - a model of thick-film resistors based on percolation theory combined with deterministic model is presented. Thick-film resistors are described as random resistor networks where parameters from deterministic model introduce microstructural characteristics and site model with double percolation introduces macrostructural characteristics of thick-film resistors into newly developed combined model illustrated by a computer simulation of thick-film resistor with $1k\Omega/\square$ sheet resistance.

COMPUTER SIMULATION OF THICK-FILM RESISTORS AS RANDOM RESISTOR NETWORKS

Zdravko Stanimirović, Ivanka Stanimirović